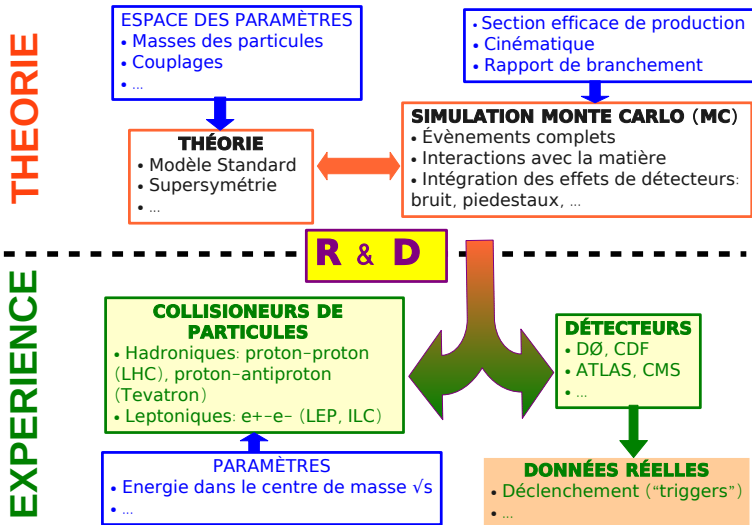


Paver le chemin vers le Higgs supersymétrique, dans le canal bbH , $H \rightarrow \tau\tau$

A.-M. Magnan
Imperial College London

03/03/2011, Séminaire LPSC

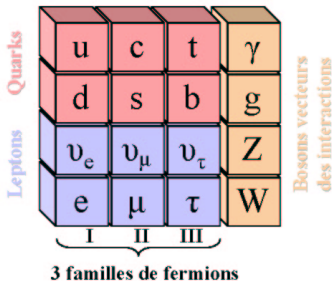
Introduction



Le Modèle Standard et le boson de Higgs

Les particules

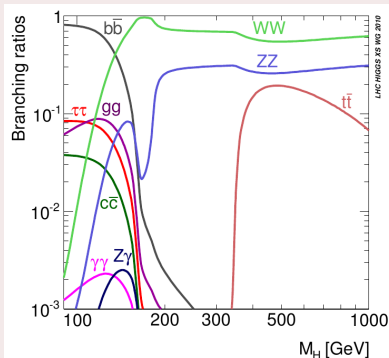
Les particules élémentaires



S. Dittmaier et al.,
 "Handbook of LHC Higgs
 Cross Sections",
 arXiv:1101.0593 (2011).

Le Boson de Higgs

- Higgs Standard: limites expérimentales LEP et Tevatron $115 < m_H < 158$ GeV or $m_H > 175$ GeV.
- Couplage proportionnel à la masse.



La Supersymétrie et le boson de Higgs

Les particules

- Symétrie Bosons $\Leftrightarrow$ Fermions
- Bosons de jauge $\Leftrightarrow$ Jauginos
- Fermions $\Leftrightarrow$ sFermions

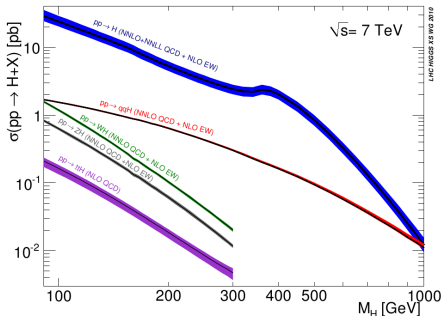
Noms des particules		spin 0	spin 1/2	spin 1	(SU(3) _c , SU(2) _L , U(1) _Y)
Supermultiplets chiraux					
squarks, quarks (× 3 familles)	Q	$(\tilde{u}_L, \tilde{d}_L)$	(u_L, d_L)		$(3, 2, \frac{1}{6})$
	$\bar{u}$	$\tilde{u}_R^*$	$u_R^\dagger$		$(\bar{3}, 1, -\frac{2}{3})$
	$\bar{d}$	$\tilde{d}_R^*$	$d_R^\dagger$		$(\bar{3}, 1, \frac{1}{3})$
sleptons, leptons (× 3 familles)	L	$(\tilde{\nu}_L, \tilde{e}_L)$	(ν_L, e_L)		$(1, 2, -\frac{1}{2})$
	$\bar{e}$	$\tilde{e}_R^*$	$e_R^\dagger$		$(1, 1, 1)$
Higgs, higgsinos	H _u	(H_u^+, H_u^0)	$(\tilde{H}_u^+, \tilde{H}_u^0)$		$(1, 2, \frac{1}{2})$
	H _d	(H_d^0, H_d^-)	$(\tilde{H}_d^0, \tilde{H}_d^-)$		$(1, 2, -\frac{1}{2})$
Supermultiplets de jauge					
gluino, gluon			$\tilde{g}$	$\bar{g}$	$(8, 1, 0)$
winos, bosons W			$\tilde{W}^\pm, \tilde{W}^0$	$W^\pm, W^0$	$(1, 3, 0)$
bino, boson B			$\tilde{B}^0$	B^0	$(1, 1, 0)$

Les Bosons de Higgs

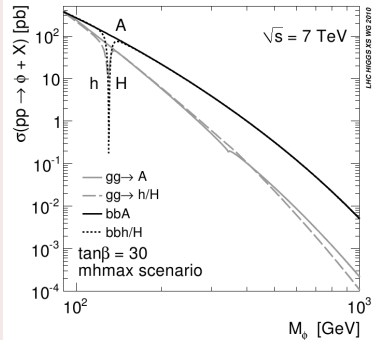
- MSSM: Modèle Standard Supersymétrique Minimal
⇒ 105 paramètres libres de plus!
- Doublet de Higgs ⇒ 5 nouvelles particules: h, H, A, H^+, H^- .
- Désintégration et rapports de branchement: très dépendant du modèle et de l'endroit de l'espace des paramètres.

La chasse au Higgs au LHC

Modèle Standard



MSSM



S. Dittmaier et al., "Handbook of LHC Higgs Cross Sections",
arXiv:1101.0593 (2011).

Pourquoi le canal bbH , $H \rightarrow \tau\tau$?

$pp \rightarrow b + H/A/h$

- Supersymétrie: section efficace plus élevée.
- Valable pour tous les champs de Higgs neutres, léger ou lourd.
- Association avec un jet de b: réduction du bruit de fond W/Z + jets

$H \rightarrow \tau\tau$

- Supersymétrie: rapport de branchement plus élevé.
- $\text{BR}(\tau \rightarrow l\nu_l\nu_\tau) \simeq 17.5\%$.
- $\tau \rightarrow l\nu_l\nu_\tau$: lepton isolé $l = e, \mu \Rightarrow$ réduction du bruit de fond QCD.
- $\tau \rightarrow \text{jet}$: caractéristiques particulières $\Rightarrow$ réduction du bruit de fond Z+jets, top.

Comment préparer cette analyse ?

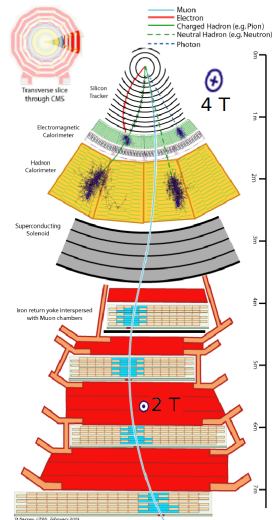
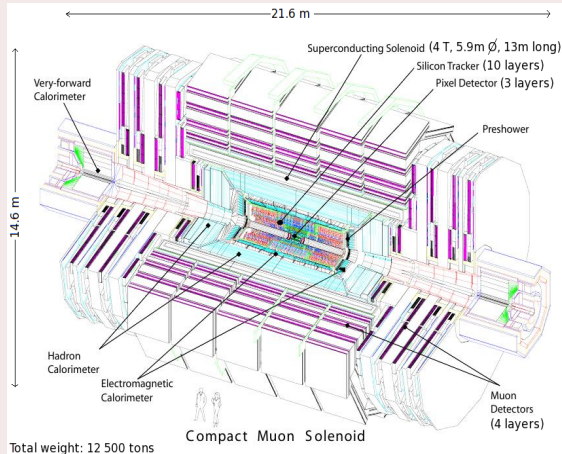
- Étude des jets étiquetés b:
 - reconstruction des jets $\Rightarrow$ performance des calorimètres, corrections en énergie. $\Rightarrow$ **Mesure de la section efficace inclusive de production de jets.**
 - étiquetage des b $\Rightarrow$ performance des détecteurs de traces.
 - comparaison Data-Théorie $\Rightarrow$ effet de résolution du détecteur $\Rightarrow$ **Méthode de déconvolution de Tikhonov et Glasko**
- Étude d'un processus similaire $\Rightarrow$ **Mesure de la section efficace b+Z**
 - point de référence pour section efficace, cinématique $\Rightarrow$ vérification de la simulation MC,
 - bruit de fond.
- préparer les futurs détecteurs $\Rightarrow$ mesure de précisions $\Rightarrow$ **CALICE: calorimètre électromagnétique numérique ultra-granulaire.**

Outline

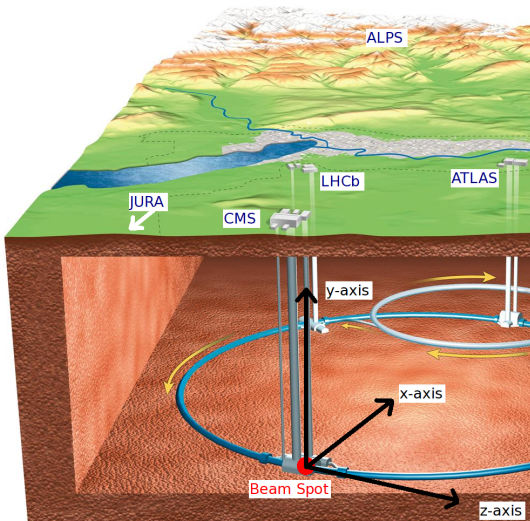
- 1 Introduction
- 2 Le détecteur CMS
- 3 Section efficace inclusive de la production de jets
- 4 Correction des effets de résolution du détecteur
- 5 Mesure de la section efficace du processus b+Z
- 6 Étude d'un calorimètre électromagnétique numérique ultra-granulaire
- 7 Conclusion

Le détecteur CMS: Compact Muon Solenoid

La collaboration CMS: 39 pays, 169 instituts, 3170 personnes.



Le système de coordonnées



Définitions

- Centre: point de collision.
- Plan transverse: x-y.
- Axe du faisceau: z.
- Angle polaire θ mesuré à partir de l'axe z.
- Angle azimutal Φ mesuré de l'axe x, dans le plan x-y.
- Energie E , quantité de mouvement p_T , énergie transverse E_T .
- Rapidité: $E = m_T \cosh(y)$,
 $y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E+p_z}{E-p_z} \right) = \tanh^{-1} \left(\frac{p_z}{E} \right)$.
- Pseudo-rapidité: $E = E_T \cosh(\eta)$,
 $\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$.

Outline

- 1 Introduction
- 2 Le détecteur CMS
- 3 Section efficace inclusive de la production de jets**
- 4 Correction des effets de résolution du détecteur
- 5 Mesure de la section efficace du processus b+Z
- 6 Étude d'un calorimètre électromagnétique numérique ultra-granulaire
- 7 Conclusion

Objectif et stratégie

- Objectif: valider les algorithmes de reconstruction des jets.
- Outil: predictions de QCD perturbative $\frac{d^2\sigma}{dp_T dy} \Rightarrow$ processus dominant de production de jets de haut p_T .
- Stratégie:
 - sélection des évènements: déclenchement sur un jet $\Rightarrow$ seuil en énergie.
 - réjection du bruit de fond: faisceau $\Rightarrow$ vertex primaire, bruit électronique $\Rightarrow$ énergie totale partagée entre plusieurs systèmes (calo, traces) ou plusieurs cellules.
 - Définition de la granularité en p_T et $y \Rightarrow$ par intervalle (p_T, y),
 $N_{jets} = \epsilon \mathcal{L} \sigma$.
 - $\frac{d^2\sigma}{dp_T dy} = \frac{C_{res} \times N_{jets}}{\epsilon \mathcal{L} \Delta p_T \Delta y}$, $\epsilon = 1$, $\Delta y = 1$, Δp_T variable, $C_{res} \simeq 80 - 95\%$
 - C_{res} : correction des effets de résolution du détecteur $\Rightarrow$ comparaison avec la théorie au niveau "hadrons". Méthode "Ansatz" (bin-par-bin améliorée) développée à DØ.

Quels jets ? Le concept Jet-Plus-Traces (JPT)

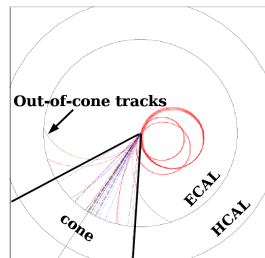
- Point de départ: jets purement calorimétriques.
- Idée générale: remplacer E_T^{calo} par p_T^{traces} $\Rightarrow$ meilleure réponse et résolution.
- Prise en compte des effets zero-suppression (HCAL) / selective readout (ECAL):

$$E_{ZSP} = E_{jet}^{Raw} \times f_{ZSP}(E_{jet}^{Raw}, \eta_{jet})$$
- Ajout traces In-Vortex-In-Cone (IVIC), soustraction réponse moyenne attendue dans ECAL+HCAL:

$$E_{JPT1} = E_{ZSP} + \sum_{IVIC\ trk} (p_{trk} - \langle E_{trk}^{calo} \rangle)$$
- Ajout traces In-Vortex-Out-of-Cone (IVOC):

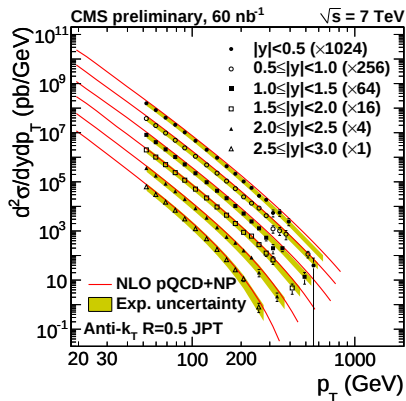
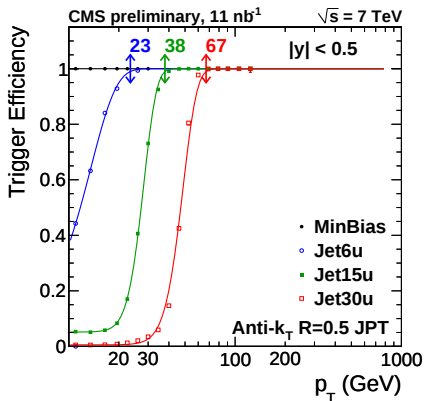
$$E_{JPT2} = E_{JPT1} + \sum_{IVOC\ trk} p_T^{trk}$$
- Soustraction réponse moyenne attendue dans ECAL+HCAL pour traces Out-of-Vortex-In-Cone (OVIC): $E_{JPT3} = E_{JPT2} - \sum_{OVIC\ trk} \langle E_{trk}^{calo} \rangle$
- Correction des inefficacités d'identification des traces, électrons et muons dans les jets, ...

CMS-PAS-JME-09-002



Déclenchement et Spectre en p_T

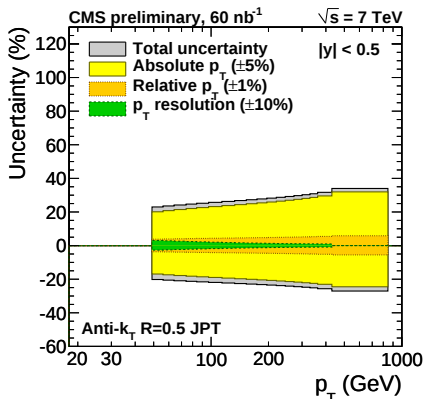
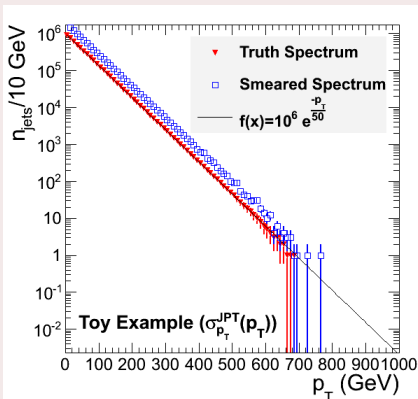
CMS-PAS-QCD-10-011



Un spectre exponentiellement décroissant....

Incertitude JES

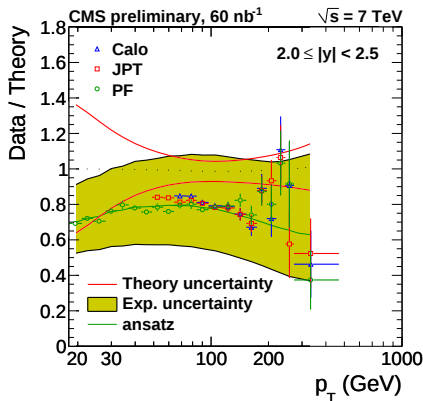
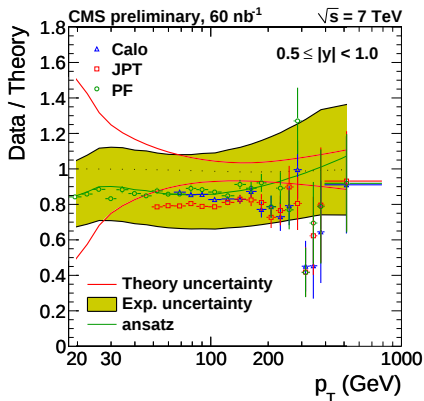
- Avec 5% d'incertitude sur la mesure de l'énergie des jets,
- impact sur la section efficace $\simeq \times 5$.



Le résultat final...bientôt pour PRL !

CMS-PAS-QCD-10-011

PRL: sur 36 pb^{-1} de luminosité intégrée.



Outline

- 1 Introduction
- 2 Le détecteur CMS
- 3 Section efficace inclusive de la production de jets
- 4 Correction des effets de résolution du détecteur**
- 5 Mesure de la section efficace du processus b+Z
- 6 Étude d'un calorimètre électromagnétique numérique ultra-granulaire
- 7 Conclusion

Les méthodes existantes

Corrections bin-par-bin $\Rightarrow$ Validité limitée !

- Un facteur par bin: ratio MC(reco)/MC(gen).
- Validité: migrations d'un bin à l'autre négligeables.
- Limitation: forme MC $\Rightarrow$ biais, corrélations entre bins ignorées $\Rightarrow$ erreur statistique fausse.

Corrections bin-par-bin "améliorées": méthode "Ansatz" $\Rightarrow$ Jets Inclusifs

- Paramétrisation des données avec fonction théorique convoluée par résolution du détecteur (Gaussienne, σ mesuré dans les données ou MC).
- Spectre inclusif des jets: $f(p_T) = N p_T^{-a} \left(1 - \frac{2 \cosh(y_{min}) p_T}{\sqrt{s}} \right)^b \exp \frac{-\gamma}{p_T}$
- $F(p_T) = \int_0^\infty f(x) R(x, p_T) dx$. Fit $\Rightarrow$ extraction de a, b, γ et N.
- Facteur de correction: $C_{res} = f(p_T)/F(p_T)$ par bin.
- Limitation: forme théorique $\Rightarrow$ biais, erreur statistique fausse, hypothèse de résolution gaussienne.

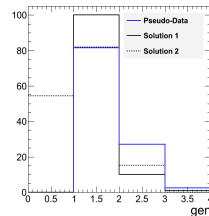
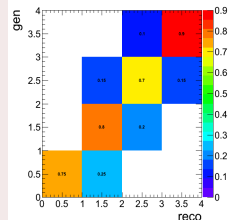
Déconvolution $\Rightarrow$ The way to go !

- Résolution mathématique. Corrélations entre bins prises en compte $\Rightarrow$ propagation des erreurs correctes.
- Difficulté: obtention de la matrice de résolution.

Déconvolution: problématique

- Problème général: $F(y) = \int f(x) \times R(x, y) dx$.
- $F(y)$ connue $\Rightarrow$ DONNÉES INITIALES.
- $R(x, y)$ à définir $\Rightarrow$ MATRICE DE RÉPONSE/RÉSOLUTION.
- $f(x)$ à trouver $\Rightarrow$ DISTRIBUTION FINALE.
- Noms: ill-posed problem, inverse problem, Unfolding.
- Ill-posed: infinité de solutions, quelle est la bonne ?
- Idéalement: solution mathématique. Pas toujours évident...
- Récemment: Workshop on Unfolding
<http://indico.cern.ch/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=107747#2011-01-20>
- Dans la suite: fonction test = spectre jet inclusif NLO pQCD dégradé par résolution gaussienne du détecteur.

Exemple



Approche de Tikhonov et Glasko

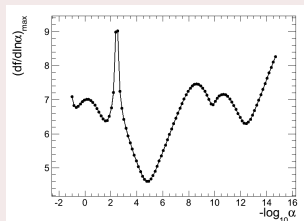
En collaboration avec Olga Kodolova (INP Moscow)

Inversion de matrice

- ajout de termes hors-diagonale
- fonction de α , λ à choisir.
- Tikhonov: $\lambda = \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n}$, $n=1$

Paramètre de minimisation

- Courbe d'optimisation: $|f_\alpha - f_0|_{\min} \simeq \frac{\partial f}{\partial \ln \alpha} d \ln \alpha$
- Tikhonov A.N., Glasko V.B.
Vych.Mat.mat.Fiz, 1965, vol 5 p 463.



$$\begin{pmatrix} A_{00} + \alpha(1 + \lambda) & A_{01} + \alpha(1 - \lambda) & A_{02} \dots & A_{0,m-2} & A_{0,m-1} \\ A_{10} + \alpha(1 - \lambda) & A_{11} + \alpha(1 + 2\lambda) & A_{12} + \alpha(1 - \lambda) \dots & A_{1,m-2} & A_{1,m-1} \\ A_{20} & A_{21} + \alpha(1 - \lambda) & A_{22} + \alpha(1 + 2\lambda) & A_{23} + \alpha(1 - \lambda) \dots & A_{2,m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & A_{m-2,m-3} + \alpha(1 - \lambda) & A_{m-2,m-2} + \alpha(1 + 2\lambda) & A_{m-2,m-1} + \alpha(1 - \lambda) \\ \dots & \dots & \dots & \dots A_{m-1,m-2} + \alpha(1 - \lambda) & A_{m-1,m-1} + \alpha(1 + \lambda) \end{pmatrix}$$

Matrice de Réponse

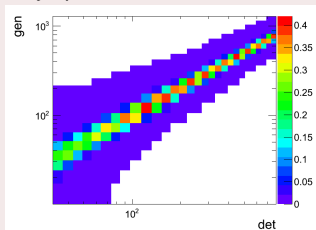
Problématique

- En général: MC, reco vs gen.
- Résolution: simulation complète du détecteur.
- Validité: forme MC = forme data.
- Différence de forme $\Rightarrow$ erreur systématique
- Plusieurs MC préférables !
- Jets inclusifs: Pythia FAUX !! Pas de générateurs acceptables $\Rightarrow$ seulement théorie NLO....
- Comment définir cette matrice ??

Définition de la matrice de réponse

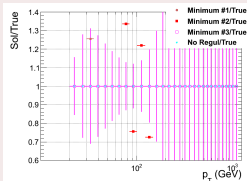
$$R_{ij} = \frac{P(\text{observed in bin } i \text{ and true value in bin } j)}{P(\text{true value in bin } j)} = \frac{\int_{\text{bin } i} dx \int_{\text{bin } j} dy R(x, y) f_{\text{true}}(y)}{\int_{\text{bin } j} dy f_{\text{true}}(y)}$$

- 1 MC: calculs jets NLO $\Rightarrow$ ajout de la résolution
- 2 Résolution purement gaussienne.
- 3 Ajout d'une estimation de la fonction analytique.

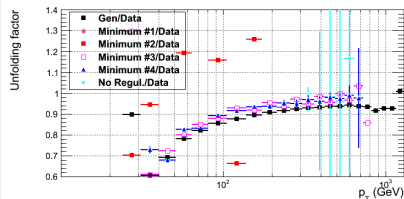


Application au spectre exponentiellement décroissant des jets

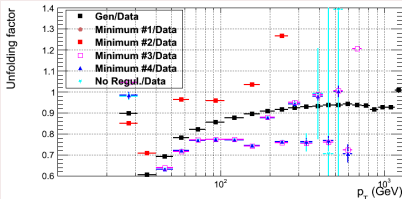
Forme: théorie, reso: gaussienne



Forme: interpolation, reso: gaussienne



Forme: négligée, reso: gaussienne



- Forme: théorie $\Rightarrow$ biais vers ce qu'on cherche.
- Forme: négligée $\Rightarrow$ binning ? Statistique...
- Forme: interpolation $\Rightarrow$ procédure itérative.
- Conclusion: à suivre !

Outline

- 1 Introduction
- 2 Le détecteur CMS
- 3 Section efficace inclusive de la production de jets
- 4 Correction des effets de résolution du détecteur
- 5 Mesure de la section efficace du processus b+Z**
- 6 Étude d'un calorimètre électromagnétique numérique ultra-granulaire
- 7 Conclusion

Le processus b+Z en théorie

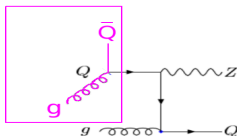
Campbell *et al.*Dittmaier *et al.*, Reina *et al.*

Calcul de la section efficace

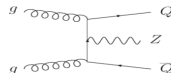
- 1 LO $g + b \rightarrow Z + b$, $m_b = 0$:
- $g \rightarrow b\bar{b}$ dans calculs de PDF i.e. tous ordres.
 - termes α_S et $\frac{1}{\ln(\frac{m_Z}{m_b})}$
 - calculs NLO existent

- 2 LO $g + g \rightarrow Z + b + \bar{b}$, $m_b \neq 0$:
- $g \rightarrow b\bar{b}$ explicite,
 - 1 b peut s'échapper $\Rightarrow Z + b$,
 - termes divergents $\alpha_S \ln(\frac{m_Z}{m_b})$.
 - calculs NLO avec $m_b \neq 0$ en développement.

5-Flavour scheme in b-PDF



4-Flavour scheme



Stratégie de l'analyse

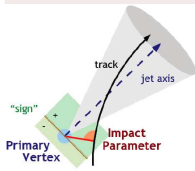
CMS-PAS-EWK-10-005

CMS-PAS-BTV-10-001

Selection

- Déclenchement: 1 e (μ)
 $p_T > 22$ (15) GeV (haute luminosité).
- ≥ 2 e (μ) $p_T > 25$
(20) GeV, $|\eta| < 2.5$ (2.1),
identifiés et isolés $\Rightarrow$
 $\epsilon_{trig} \simeq 100\%$, rejection
QCD et W.
- ≥ 1 jet (PF ou JPT)
 $p_T > 25$ GeV, $|\eta| < 2.1$,
 $\Delta R(jet - leptons) > 0.5$.
- Saveurs b: 4 alternatives.
- $ME_T < 40$ GeV,
 $60 < M_{ll} < 120$ GeV $\Rightarrow$
Rejection $t\bar{t}$.

Étiquetage des b



- Track-counting: traces
classées par IP/σ_{IP} , High-Eff
= 2nd valeur, High-Pur = 3rd
valeur.
- Simple Secondary Vertex:
vertex secondaires avec au
moins 2 (High-Eff) ou 3
(High-Pur) traces associées.

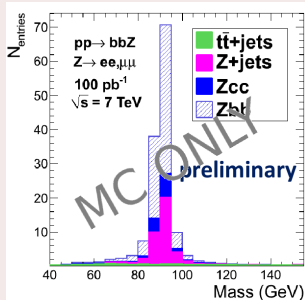
Sample	Z+b	Z+l,c
TCHE	0.494 ± 0.003	0.0074 ± 0.0009
SSVHE	0.417 ± 0.003	0.0084 ± 0.0006
TCHP	0.244 ± 0.002	0.0005 ± 0.0003
SSVHP	0.207 ± 0.002	0.0004 ± 0.0002

Résultats attendus et à venir

CMS-PAS-EWK-10-015

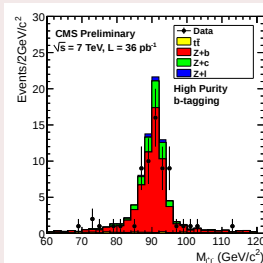
Pure MC, $\sqrt{s} = 10$ TeV

- $\mathcal{L}_{int} = O(100) \text{ pb}^{-1}$
- CMS-AN-2010/027



À venir ...

- Data: analyse des données de 2010 pour Moriond 2011, $\sqrt{s} = 7$ TeV, $\mathcal{L}_{int} = 36 \text{ pb}^{-1}$, **CMS-PAS-EWK-10-015**.
- Collaboration avec Louvain, Aachen.
- Verification du ratio $\frac{Z+b}{Z+j}$, comparaison avec MCFM (calculs NLO)



Outline

- 1 Introduction
- 2 Le détecteur CMS
- 3 Section efficace inclusive de la production de jets
- 4 Correction des effets de résolution du détecteur
- 5 Mesure de la section efficace du processus b+Z
- 6 Étude d'un calorimètre électromagnétique numérique ultra-granulaire**
- 7 Conclusion

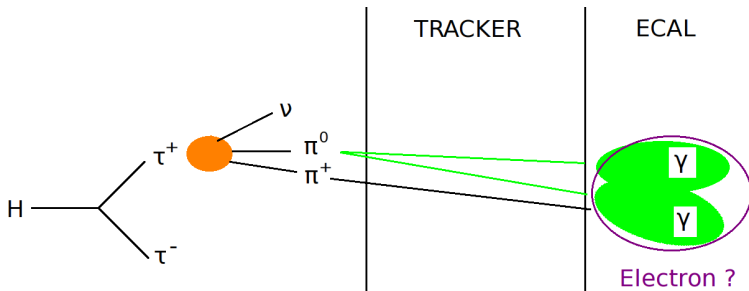
ILC, CALICE et les MAPS

International Linear Collider

- electron-positron: mesures de precision.
- LHC: mesure $\sigma \times BR$.
- ILC: mesure BR .

CALICE

- R&D Calorimètres pour l'ILC.
- ECAL: étude d'un capteur MAPS $\Leftrightarrow$ silicium avec électronique de lecture intégrée.
- Ultra-granularité $\Rightarrow$ lecture numérique $\Rightarrow$ effet sur la résolution en énergie ?



Numérique vs analogique

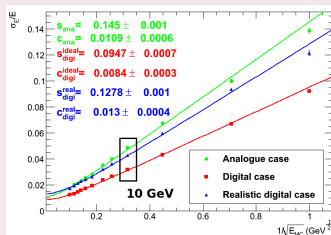
	Analogue	Digital
Measure	$E_{\text{deposited}} \propto N_{\text{Charged particles}} \propto E_{\text{incident}}$	$N_{\text{Charged particles}} \propto E_{\text{incident}}$
Fluctuations	statistical, angle of incidence, velocity and Landau spread	statistical
Ideal resolution	$\simeq \frac{0.15}{\sqrt{E}}$ for ILC-like ECAL	$\simeq \frac{0.10}{\sqrt{E}}$ for ILC-like ECAL
Realistic effects	noise, dead areas	Charge diffusion, noise, dead areas, counting particle
Impact	Expected small	under study/never measured

AMM, P. Dauncey, J. Ballin, LCWS 08

Simulation MC

- Geant 4: photons de 1 à 100 GeV.
- Analogique: énergie totale déposée.
- Numérique: nombre total de particules.
- Résolution $\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\frac{b^2}{E^2} + \frac{s^2}{E} + c^2}$.
- Conditions réelles: bruit, partage de charges, ...

Résolution en énergie



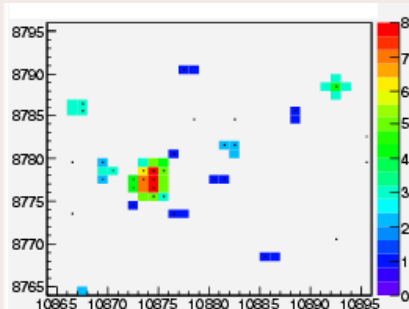
Effets de détecteurs

Effets du détecteur

- Bruit: $\simeq 5\%$ dégradation pour augmentation du bruit d'un facteur 2.
- Zones non-instrumentées: $\simeq 6\%$ dégradation + $\simeq 2\%$ en ajoutant les effets de bord du capteur.
- Diffusion des charges aux cellules voisines : après clustering, $\simeq 5\%$ dégradation.
- Particules traversant plusieurs pixels: $\simeq 20\%$ dégradation
- Total: $\simeq 35\%$.

AMM, P. Dauncey, J. Ballin, LCWS 08

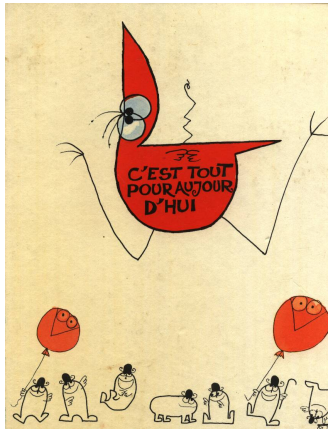
Effet dominant: comptage des particules



Conclusion

- La chasse au Higgs est ouverte : préparation nécessaire !
- Au jour le jour: suivi des conditions de prise de données pour rester optimal.
- Vérification du détecteur et des logiciels: e.g. échelle d'énergie des jets, reconstruction des résonances connues (W , Z , J/ψ , ...), saveurs lourdes.
- Nouvelle Physique: être prêts en analysant des canaux similaires, point de références, itération avec théoriciens.
- Préparer le futur: étude de nouveaux accélérateurs / détecteurs / capteurs.

Merci de votre attention!



BACKUPS

The LHC

Collisions	pp		Heavy ions	
Parameter	Start-up	Nominal	Start-up	Nominal
Energy/nucleon (TeV)	5	7	2.76	2.76
Luminosity ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	10^{31} - 10^{32}	10^{34}	5×10^{25}	10^{27}
Bunch separation (ns)	25-50-75	25	1350	99.8
No. of bunches	43/156/936-2808	2808	62	592
particles/bunch	0.5×10^{11}	1.15×10^{11}	7.0×10^7	7.0×10^7
β -value at IP (m)	1-3	0.55	1.	0.5-0.55
RMS beam radius at IP (μm)	16.7	16.7	15.9	15.9
Luminosity lifetime (hour)	15	15	14/7.5/5.5	8/4.5/3
Collisions/crossing	$\simeq 3$	$\simeq 20$	-	-

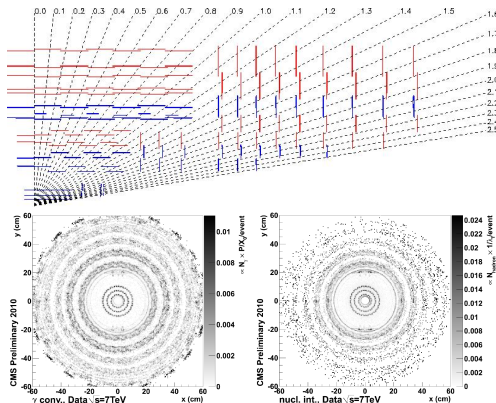
The CMS calorimeters

- EM : $|\eta| < 3$,
 - PbWO_4 crystals,
 - $24.7\text{--}25.8 X_0$, 1.1λ ,
 - 1 longitudinal section + preshower ($3 X_0$),
 - $\Delta\eta \times \Delta\Phi = 0.0175 \times 0.0175$,
 - $\sigma/E \simeq 2 - 5\%/\sqrt{E}$.
- HCAL : $|\eta| < 3$,
 - Brass/Scintillator sampling calorimeter,
 - $6\text{--}10 \lambda$
 - 2 longitudinal sections + Outer HCAL (3λ for $|\eta| < 1.4$)
 - $\Delta\eta \times \Delta\Phi \geq 0.0875 \times 0.0875$,
 - $\sigma/E \simeq 100\%/\sqrt{E} \oplus 0.05$.
- HF : $3 < |\eta| < 5$,
 - Fe/Quartz fibers, Cerenkov light
 - EM $90 X_0$, HAD 9.5λ
 - 1 EM + 1 HAD longitudinal sections

The tracker in more details

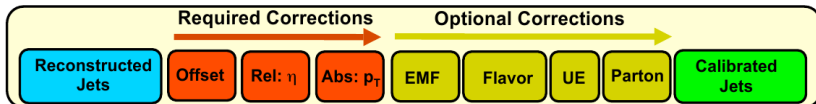
Silicon detector

- World-record silicon surface of 200 m^2 .
- Brilliant granularity: 10 M strips, $66 \text{ M } 100 \times 150 \mu\text{m}^2$ pixels.
- Charged particle is Si strip / pixels : hit.
- Multiple layers: trajectory.
- tracking = very complicated algorithm: identification of kinks, bremsstrahlung, conversions, ...
- Mapping of material possible just by reconstructing photon conversions or nuclear interactions.



CMS-PAS-TRK-10-003

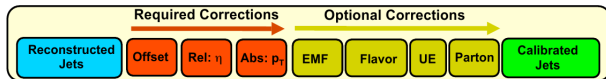
The CMS energy correction strategy



- $p_T^{Rel} = C_{Rel}(\eta, p_T^{Offset}) \times p_T^{Offset}$
- $E_T^{Corr} = (E_T^{Raw} - E_T^{Offset}) \times C_{Rel}(\eta, p_T^{Offset}) \times C_{Abs}(p_T^{Rel})$
- From MC truth information.
- From data: using physics processes.
- JEC = Jet Energy Correction = E_T^{Truth} / E_T^{Raw} ,
- JER = Jet Energy Response = E_T^{Reco} / E_T^{Truth} or Jet Energy Resolution = σ_E / E ! In this talk: Jet Energy Resolution.
- JES = Jet Energy Scale = E_T^{Reco} / E_T^{Truth} .
- Job well done: $E_T^{Reco} = E_T^{Corr} = E_T^{Truth}$

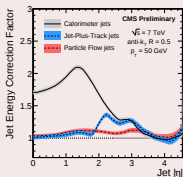
Jet Energy Corrections and Uncertainties

CMS-PAS-JME-10-010

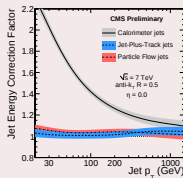


Relative η dependence

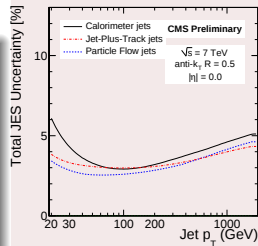
- Dijet balance
- γ +Jet, Missing E_T Projection Fraction



Absolute p_T scale

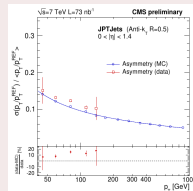
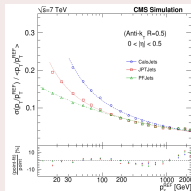


Total JES Uncertainty



Jet Energy Resolution

- Dijet Asymmetry $\Rightarrow$ syst. 10%

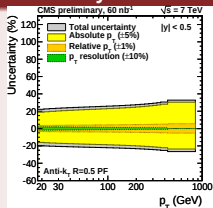


Inclusive Jet Analysis : the Method

CMS-PAS-QCD-10-011

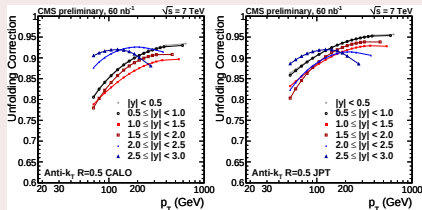
- Calo, JPT and PF Jets: cross-check of systematics
- Beam background + noise cleaning
- Minimum bias + single jet triggers
- 6 rapidity regions $0 < |y| < 3$
- Data $\Leftrightarrow$ NLO pQCD @ hadron level: data - detector effects, NLO + non-perturbative effects.

Main systematics



- Luminosity: 11%.
- Absolute p_T scale: 5% on JES $\Rightarrow$ 25% on cross-section.

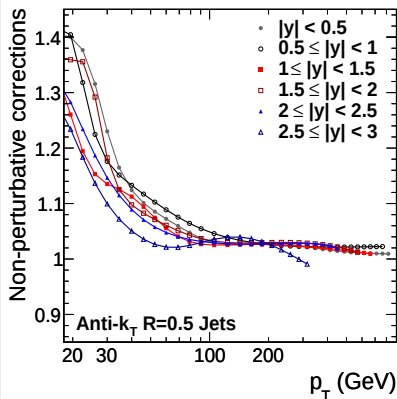
Unfolding Method (DØ Ansatz fit)



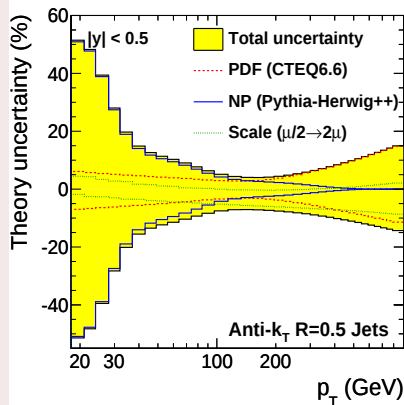
- Theory-motivated function: $f(p_T) = N p_T^{-a} \left(1 - \frac{2 \cosh(y_{min}) p_T}{\sqrt{s}}\right)^b \exp \frac{-\gamma}{p_T}$
- Gaussian resolution $R(p_T^{gen}, p_T^{reco})$
- Data $F(p_T) = \int_0^\infty f(x) R(x, p_T) dx$
- $C_{res} = f(p_T) / F(p_T)$
- $\frac{d^2 \sigma}{dp_T dy} = \frac{C_{res} N_{jets}}{\mathcal{L} \epsilon \Delta p_T \Delta y}$

Inclusive Jet Analysis : Theoretical uncertainties

Non-perturbative corrections from Pythia and Herwig++



Uncertainties on final cross-section



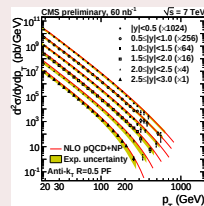
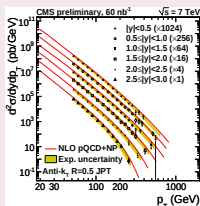
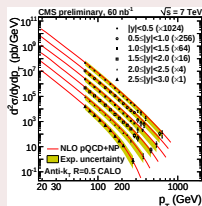
Inclusive Jet Analysis : the Results

Comparison between 3 algorithms: systematics well under control.

p_T spectrum for CALO jets

JPT jets

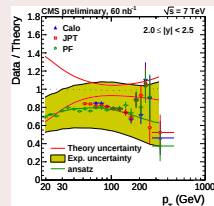
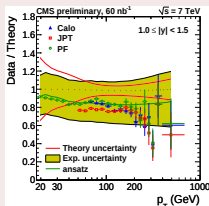
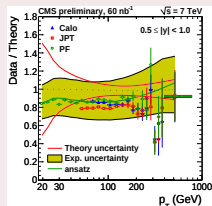
PF jets



Data/Theory for $0.5 < |y| < 1$

$1 < |y| < 1.5$

$2 < |y| < 2.5$



The Math in brief

Using Tikhonov Regularisation

- To solve: $\vec{D} = \hat{R} \times \vec{T}$, $\vec{D}$ =data vector, $\vec{T}$ =true vector, $\hat{R}$ =resolution matrix.
- $\hat{R}$: matrix $n \times m$, n =det bins, m =gen bins. General case: $n \geq m$, inverse does not always exist.
- Solve instead: ${}^t\hat{R}\vec{D} = {}^t\hat{R}\hat{R} \times \vec{T}$
- Exact solution: $\vec{T} = ({}^t\hat{R}\hat{R})^{-1} \times {}^t\hat{R}\vec{D}$
- Call $\hat{A} = {}^t\hat{R}\hat{R}$
- Regularised solution: minimise $\hat{R}\vec{T} - \vec{D} + \alpha \times [\vec{T}^2 + \partial T / \partial p_T^2]$
- After some math $\Rightarrow$ replace $\hat{A}$ by $\hat{A} + \alpha(1 + \hat{\Lambda})$
- $\hat{\Lambda} \neq 0$ only for elements next to diagonal.

$$\begin{pmatrix} A_{00} + \alpha(1 + \lambda) & A_{01} + \alpha(1 - \lambda) & A_{02} \dots & A_{0,m-2} & A_{0,m-1} \\ A_{10} + \alpha(1 - \lambda) & A_{11} + \alpha(1 + 2\lambda) & A_{12} + \alpha(1 - \lambda) \dots & A_{1,m-2} & A_{1,m-1} \\ A_{20} & A_{21} + \alpha(1 - \lambda) & A_{22} + \alpha(1 + 2\lambda) & A_{23} + \alpha(1 - \lambda) \dots & A_{2,m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & A_{m-2,m-3} + \alpha(1 - \lambda) & A_{m-2,m-2} + \alpha(1 + 2\lambda) & A_{m-2,m-1} + \alpha(1 - \lambda) \\ \dots & \dots & \dots & \dots A_{m-1,m-2} + \alpha(1 - \lambda) & A_{m-1,m-1} + \alpha(1 + \lambda) \end{pmatrix}$$

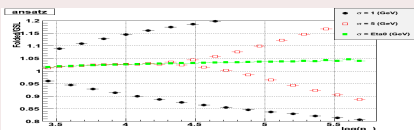
Discussion on response matrix bias

- General formula for response matrix R_{ij} given in Cowan's book, page 157:

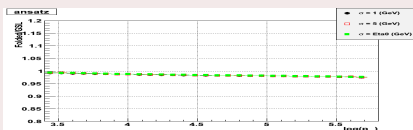
$$R_{ij} = \frac{P(\text{observed in bin } i \text{ and true value in bin } j)}{P(\text{true value in bin } j)} = \frac{\int_{\text{bin } i} dx \int_{\text{bin } j} dy R(x, y) f_{\text{true}}(y)}{\int_{\text{bin } j} dy f_{\text{true}}(y)}$$

- In the approximation $R(x, y) = \text{cst}$ **over each gen bin**, $R_{ij} = \int_{\text{bin } i} dx \Delta y_j R(x, y)$ is correct.
- Not true depending on binning chosen, and bias depends on the true function shape.
- In practice, recommended to use whatever best approximation of $f_{\text{true}}(y)$ is available.
- Plots below use Ansatz functional form as 'true' input. GSL=numerical integration of the convoluted function. Folded=using binned response matrix on true input.
- With f-shape added in response matrix: less dependence on sigma, bias reduced.

Folded/GSL without f-shape



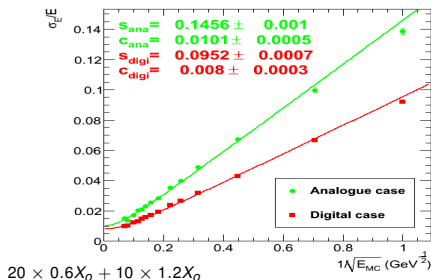
Folded/GSL including f-shape



Digital vs Analogue: motivations

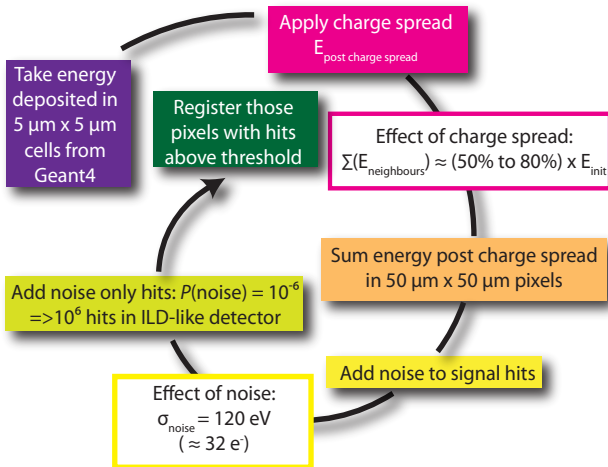
	Analogue	Digital
Measure	$E_{\text{deposited}} \propto N_{\text{Charged particles}} \propto E_{\text{incident}}$	$N_{\text{Charged particles}} \propto E_{\text{incident}}$
Fluctuations	statistical, angle of incidence, velocity and Landau spread	statistical
Ideal resolution	$\simeq \frac{0.15}{\sqrt{E}}$ for ILC-like ECAL	$\simeq \frac{0.10}{\sqrt{E}}$ for ILC-like ECAL
Realistic effects	noise, dead areas	Charge diffusion, noise, dead areas, counting particle
Impact	Expected small	under study/never measured

- Can we measure the number of charged particles directly?
- Can we get anywhere near the ideal resolution for the digital case?

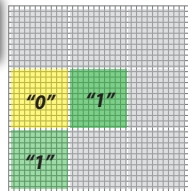
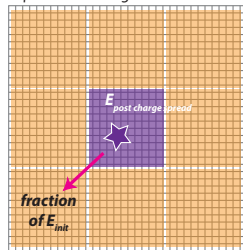


La chaîne de numérisation

Des conditions idéales aux conditions réelles

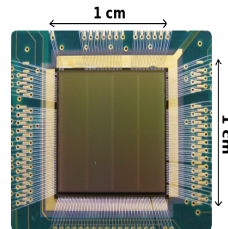
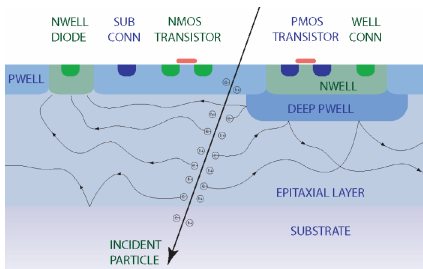
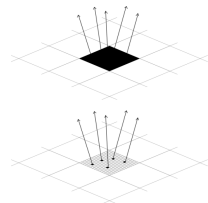


5 μm simulation grid



A digital ECAL based on MAPS

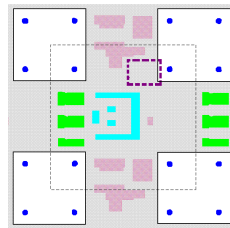
- EM shower density $\simeq 100 \text{ mm}^{-2}$ in core $\Rightarrow$ need pixels $\simeq 50 \mu\text{m}$ with binary readout = hit/no hit
- Very high granularity should help with PFA too
- Real ECAL: $\simeq 10^{12}$ pixels $\Rightarrow$ need readout integrated into pixel
- Implement as CMOS MAPS sensor, including deep p-well INMAPS process to shield PMOS circuit transistors and increase charge collection efficiency.
- First version: TPAC 1.0 (Tera Pixel Active Calorimeter)



TPAC 1.0

TPAC 1.0 : pixel design

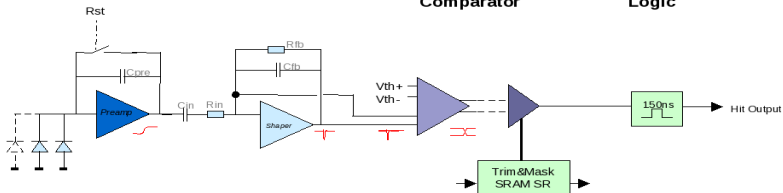
- $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ pixel, with two variants: “preshapers” and “presamplers”. Preshapers perform better and are described here.
- $0.18 \mu\text{m}$ CMOS process with INMAPS deep p-well implant
- Every pixel has 4 diodes, charge preamplifier and shaper, mask and 4-bit pedestal trim, asynchronous comparator and monostable to give hit/no hit response
- Pixel hits stored with 13-bit timestamp on-sensor until end of bunch train.



Pre-Shape Pixel Analog Front End

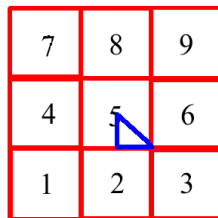
Low gain / High Gain Comparator

Hit Logic



Charge diffusion measurement and simulation

- Charge diffuses to neighbouring pixels:
 - Reduces signal in “hit” pixel
 - Causes hits in neighbouring pixels
 - Need to make sure this is correctly modelled
- Simulation using Sentaurus package
 - Full 3D finite element model
 - 3×3 pixel array = $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ area
 - Thickness of silicon to $32 \mu\text{m}$ depth; covers epitaxial layer of $12 \mu\text{m}$ plus some of substrate
- Use laser to fire at different points within pixel
 - Scan bottom-right corner.
 - Laser spot size $< 2 \mu\text{m}$, step size $5 \mu\text{m}$.
 - Assuming symmetry means these cover whole pixel surface
- Measure signal using threshold scan in centre pixel and all eight neighbours

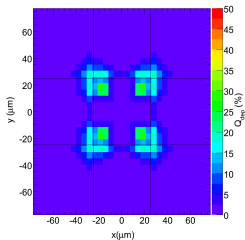


Charge diffusion results

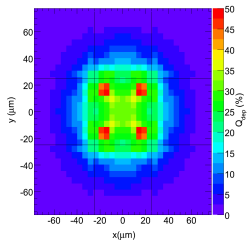
Validation of the INMAPS process

Sentaurus Simulation

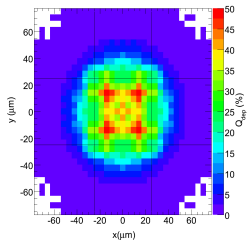
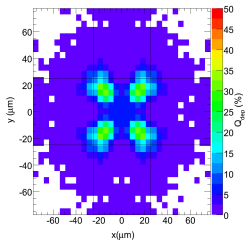
No deep p-well implant



With deep p-well implant



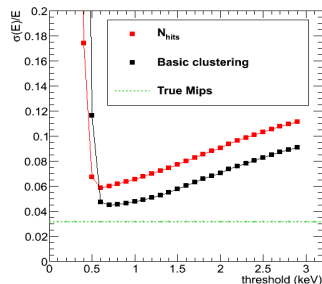
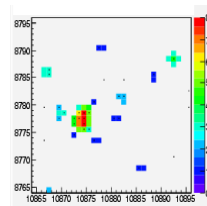
Real Data with Laser



MIP clustering

Dominant effect: hit confusion

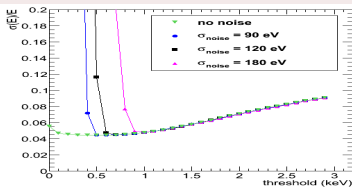
- Basic property of an EM shower
 - How dense are hits in the core?
 - GEANT4 not verified at this granularity
- Clustering helps but it is not clear where the limit is
 - Which algorithm to use depends on effects which may not be modelled well
 - Dominant effect in degrading the resolution
 - Major study of clustering algorithms still to be done
 - Essential to get experimental data on fine structure of showers to know realistic resolution



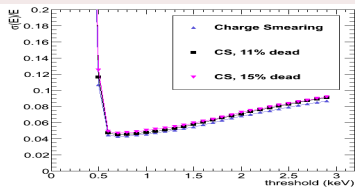
10 GeV electrons

Impact of each step with 10 GeV electrons

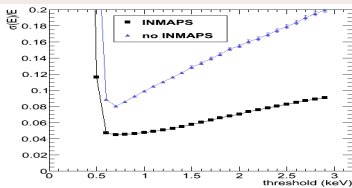
Effect of noise



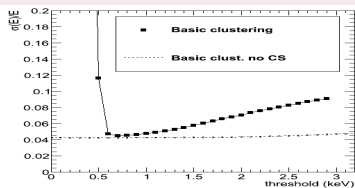
Effect of dead area



Effect of INMAPS process



Effect of charge diffusion



Resolution vs Energy

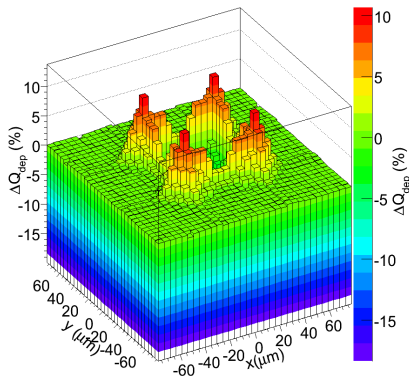
- Now have concrete noise values and measured charge diffusion
- Current extrapolation to “real” detector shows significant degradation of ideal DECAL resolution, but still less than ideal analogue resolution.
- 35% increase in error.
- Number of pixels hit not trivially related to number of charged tracks

Degradation arises from

- Noise hits : $\simeq 5\%$ degradation when increasing noise by factor 2.
- Dead area : $\simeq 6\%$ degradation + $\simeq 2\%$ if adding sensor edges effect.
- Charge diffusion to neighbouring pixels : after clustering, $\simeq 5\%$ degradation.
- Particles crossing pixels boundaries and sharing pixels : $\simeq 20\%$ degradation.

Comparison between data and simulation

No deep p-well implant $Q_{dep}^{Simu} - Q_{dep}^{data}$



With deep p-well implant $Q_{dep}^{Simu} - Q_{dep}^{data}$

